

Automatisierte Methoden der Erfassung von Rufen und Gesängen in der avifaunistischen Feldforschung

Karl-Heinz Frommolt, Ommo Hüppop, Rolf Bardeli, Reinhold Hill, Martina Koch, Klaus-Henry Tauchert & Raimund Specht

Frommolt K-H, Hüppop O, Bardeli R, Hill R, Koch M, Tauchert K-H & Specht R 2012: Methods for the automatic recording of bird calls and songs in field ornithology. *Vogelwarte* 50: 65-78.

This review presents our current knowledge on automated methods for acoustic recording of calls and songs of birds. Acoustic long-term recordings can serve as a basis for an automated bird census. We stress the question of whether sound recordings are suitable for qualitative and quantitative analysis of bird populations. Special attention is devoted to autonomous recording methods and the evaluation of long-term recordings by use of acoustic pattern recognition algorithms. Realistic scenarios for the use of automated methods in field ornithology we see in the investigation of nocturnal bird migration, the census of nocturnal bird species, and data collection in core areas of nature reserves.

✉ KHF: Museum für Naturkunde - Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, Invalidenstraße 43, D-10115 Berlin. E-Mail: karl-heinz.frommolt@mfn-berlin.de

OH: Institut für Vogelforschung "Vogelwarte Helgoland", An der Vogelwarte 21, D-26386 Wilhelmshaven.

RB: Fraunhofer Institut IAIS Schloss Birlinghoven, D-53754 Sankt Augustin.

RH: Avitec Research GbR, Sachsenring 11, D-27711 Osterholz-Scharmbeck.

MK: Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Biologie, Invalidenstr. 43, D-10115 Berlin

KHT: BFUL/Sächsische Vogelschutzwarte Neschwitz, Park 2, 02699 Neschwitz.

RS: Avisoft Bioacoustics, Kirchstr. 11, D-13158 Berlin.

Einleitung

Bioakustische Methoden sind ein wesentlicher Bestandteil moderner ornithologischer Forschungen. Durch die Entwicklung der Rechnertechnik sind moderne akustische Analyseverfahren weit zugänglich. Die Anwendung umfasst nicht nur verhaltensökologische Untersuchungen zur akustischen Kommunikation (Kroodsmä & Miller 1996), sondern reicht auch hin bis zu Fragen des Einflusses von Lärm auf Vögel (Nemeth & Brumm 2010) oder der Nutzung von Stimmen als taxonomisches Merkmal (Tietze 2012, dieses Heft). In der avifaunistischen Feldforschung hingegen werden bioakustische Methoden derzeit nur vereinzelt eingesetzt.

Die avifaunistische Feldforschung ist zur Dokumentation von Veränderungen unserer Umwelt, aber auch zur Abschätzung der Folgen menschlicher Eingriffe unerlässlich. Sie liefert die Basisdaten für wissenschaftlich fundierten Naturschutz und Landschaftsplanung. Insbesondere vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels gewinnen Langzeitmonitoringprogramme zunehmend an Bedeutung. Dank standardisierter Erfassungsmethoden liegen insbesondere für Vögel fundierte Daten vor, die es erlauben, Langzeittrends in den Bestandsentwicklungen zu bewerten. Für Großbritannien z. B. reichen die Daten bis 1962 zurück (Greenwood et al. 1994). In Deutschland begannen zwar erste großräumige Erfassungen einzelner Arten (speziell

Weißstorch und Seeadler) bereits in den ersten Jahren des letzten Jahrhunderts, aber erst seit 1989 wird ein flächendeckendes Monitoring häufiger Brutvogelarten durchgeführt, das auf der Methodik der Punkt-Stopp-Zählung beruht (Schwarz & Flade 2000; Flade & Schwarz 2004). Seit 2005 wurde im Rahmen dieses bundesweiten Monitorings als neue Methode die Linienkartierung zur Erfassung von Vögeln der Normallandschaft eingeführt (Mitschke et al. 2005). Auf der Grundlage der Erfassungen von zahlreichen ehrenamtlichen Ornithologen wird damit ein zuverlässiges Bild über bundesweite Bestandsänderungen geliefert. Für seltene Brutvogelarten wurde damit im Osten Deutschlands bereits 1956 und im Westen 1977 (für sechs Brutvogelarten von Feuchtgebieten) begonnen.

Für eine Reihe von Aufgaben, wie z. B. die Erfassung des nächtlichen Vogelzuges oder die Bestandserfassung nachtaktiver oder weniger ruffreudiger Vogelarten, sind traditionelle Erfassungsmethoden jedoch entweder ungeeignet oder zeitlich sehr aufwändig. Automatisierte akustische Methoden, die bereits für das Monitoring anderer Tiergruppen erfolgreich eingesetzt werden, können auch in der avifaunistischen Feldforschung dazu beitragen, Wissenslücken zu schließen. Die akustische Erfassung von Vögeln ist z. B. im Standarduntersuchungskonzept (StUK), mit dem die Auswirkungen von

Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt untersucht werden, als Methode vorgeschrieben (Hüppop et al. 2002; Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 2007).

Die breiteste Anwendung finden akustische Methoden außerhalb der Feldornithologie derzeit bei der Erfassung von Meeressäugern und Fledermäusen. Die umfassendste Langzeitstudie wurde an Blau-, Finn- und Grönlandwalen (*Balaenoptera musculus*, *B. physalus* und *B. mysticetus*) vor der schottischen Küste durchgeführt (Charif & Clark 2009).

Für die Erfassung von Schweinswalen (*Phocoena phocoena*) und Großen Tümmlern (*Tursiops truncatus*) kommen derzeit auch in den deutschen Meeresgebieten Klickdetektoren, sogenannte T-PODs (Timing Porpoise Detectors) in großem Maßstab zum Einsatz (Philpott et al. 2007; Verfuß et al. 2007; Bailey et al. 2010; Simon et al. 2010). Eine Ermittlung der Anzahl rufender Tiere kann mit dieser Methodik jedoch nicht erfolgen.

Am weitesten fortgeschritten ist die Methodik einer automatisierten Artbestimmung auf der Grundlage akustischer Parameter für Fledermäuse (Obrist et al. 2004 und 2008; Runkel 2008). Fledermausrufe eignen sich für eine Mustererkennung sehr gut, da ihre Ultraschall-Ortungsrufe sehr laut sind und in einem Frequenzbereich liegen, der kaum von anderen Arten genutzt wird. Mit den von Obrist et al. (2004) bzw. Runkel (2008) entwickelten Systemen können mit hoher Sicherheit die meisten mitteleuropäischen Arten bestimmt werden. Eine Quantifizierung kann auch hier nur relativ über die Anzahl der aufgezeichneten Rufe erfolgen.

Auch bei Amphibien werden akustische Methoden für Bestandserfassungen eingesetzt (Gunzburger 2007; Dorcas et al. 2009).

In unserem Beitrag möchten wir beleuchten, welches Potenzial in automatisierten Verfahren für avifaunistische Untersuchungen liegt, und sinnvolle Aufgabenbereiche für deren Einsatz aufzeigen. Automatisierte Methoden ermöglichen eine weitgehend störungsfreie Erfassung, eine kontinuierliche Beobachtung, die Erfassung seltener Ereignisse und von Ereignissen, die sonst nicht zugänglich sind, wie z. B. der nächtliche Vogelzug in Offshore-Gebieten.

Autonome akustische Aufzeichnungsverfahren

Die wichtigste Voraussetzung für eine akustische Erfassung ist die Realisierung von Langzeitaufnahmen. Bereits vor mehr als 50 Jahren haben Graber & Cochran (1959) Tonaufzeichnungen zur Erfassung des nächtlichen Vogelzuges genutzt. Die Aufzeichnungen erfolgten dabei auf großen Magnetbandspulen mit Hilfe eines Parabolreflektors mit 72,5 Zoll Durchmesser. Als Mikrophon kam ein umgebauter Lautsprecher zum Einsatz. Mit dieser Technik konnten bereits 8 Stunden kontinuierlich aufgezeichnet werden. Die lange Aufzeichnungsdauer wurde aber nur bei einer geringen

Bandgeschwindigkeit von 5 cm/s erreicht, womit damals nur eine sehr schlechte Tonqualität erreicht wurde. Daher nutzten die Autoren in der Folge einen Timer, womit die Erfassung in kürzeren Intervallen erfolgte und die Aufzeichnung mit höherer Bandgeschwindigkeit möglich war. Erste durch akustische Signale ausgelöste (getriggerte) Aufzeichnungen konnten mit dem für UHER-Tonbandgeräte entwickelten Akustomat F411 realisiert werden. Die Tonaufzeichnung startete, sobald die Lautstärke einen bestimmten Schwellwert erreicht hatte. Diese Technik nutzte z. B. Pröve (1978) bei experimentellen Untersuchungen zum Gesang des Zebrafinken (*Taeniopygia guttata*). Ein großer Nachteil der Methodik war, dass meist die ersten Elemente einer Strophe gar nicht oder nicht einwandfrei aufgezeichnet wurden.

Für die Erfassung von Zugrufen von Vögeln wurde von amerikanischen Ornithologen die Tonspur eines HiFi-Videorecorders genutzt, womit acht bis neun Stunden ohne Unterbrechung aufgezeichnet werden konnten (Evans & Mellinger 1999; Farnsworth & Russell 2007).

Erst der Einzug der digitalen Tonaufzeichnung und -bearbeitung ermöglichte die kontinuierliche Registrierung über sehr lange Zeiträume und brachte auch flexiblere Lösungen für das Triggern von Tonaufzeichnungen. Eine Hybridlösung war das von Peter Kätsch entwickelte und von Dierschke (1989) eingesetzte Helgoländer Nachtzugerfassungsgerät (Evans 2005). Hierbei erfolgte zunächst eine digitale Zwischenspeicherung und erst, wenn das Signal für Flugrufe typische Eigenschaften hatte (Einzelsignale im Frequenzbereich von 3 bis 8 kHz, die einen vorher festgelegten Pegel überschritten), wurde auf Magnetband aufgezeichnet.

In den letzten Jahren ist eine Vielzahl digitaler Recorder auf dem Markt erschienen, die dank großer Speichermedien lange kontinuierliche Aufzeichnungen ermöglichen. So erstellten z. B. Hill et al. (2006) bei der Suche nach dem wahrscheinlich ausgestorbenen Elfenbeinspecht (*Campephilus principalis*) Langzeitaufzeichnungen im mp3-Format (Marantz PMD 670 mit Sennheiser ME 62). An der Cornell University (Ithaca, USA) entwickelte Festplattenrecorder wurden u. a. bei der Suche nach dem Elfenbeinspecht in Arkansas und Florida eingesetzt (Rohrbaugh et al. 2006; Hutto & Stutzman 2009). Von der Firma Wildlife Acoustics wurde ein speziell für Langzeiterfassungen von Tierstimmen konzipierter wetterfester Stereorecorder (Song Meter) entwickelt (z. B. Farina et al. 2011).

Eine weitere einfache Möglichkeit der Erstellung von Tonaufnahmen ist die direkte Speicherung mittels PC oder Notebook. Dabei sind sowohl kontinuierliche als auch zeit- oder ereignisgesteuerte Aufnahmen möglich, deren Größe nur durch die Kapazitäten der verwendeten internen oder externen Speichermedien begrenzt

ist (z. B. <http://www.waverec.de/> oder <http://www.sagebrush.com/recall.htm>). Etliche Audiorecorder-Programme ermöglichen die Aufnahme zu bestimmten programmierbaren Zeiten oder in wählbaren Intervallen. Ereignisgesteuerte Aufnahmen basieren im einfachsten Fall auf der Lautstärke des Eingangssignals: Sobald dieses einen einstellbaren Pegel überschreitet, wird die Aufnahme gestartet. Nach einer (einstellbaren) Zeit der Stille wird sie beendet. Anwender mit Programmierkenntnissen können sich auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene Lösungen auch selbst erstellen. So lässt sich das Snack Sound Toolkit verhältnismäßig leicht in die Skriptsprachen Python und Tcl/Tk einbinden (<http://www.speech.kth.se/snack/>).

Insbesondere für bioakustische Untersuchungen wurde die Software Avisoft-Recorder entwickelt (www.avisoft.com), mittels derer Mehrkanalaufzeichnungen sowohl mit zeitlichen als auch signalbasierten Triggern erstellt werden können. Ähnliches leistet das am Cornell Laboratory of Ornithology entwickelte Raven (<http://www.birds.cornell.edu/brp/raven/RavenOverview.html>). Eine auf PCs basierte Detektion und Aufzeichnung von Zugrufen realisierten Hill & Hüppop (2008) mit Hilfe des o. g. Snack Sound Toolkits. Das Triggern erfolgte dabei auf der Grundlage einer einfachen akustischen Mustererkennung (AROMA), und die Aufzeichnungen wurden direkt auf Festplatte gespeichert.

Erfassung des Artenspektrums mittels akustischer Aufzeichnungen

Bereits Parker (1991) verweist darauf, dass Tonaufzeichnungen ein äußerst effektives Mittel zur Erfassung von Vögeln sind, zumindest in der neotropischen Region. Es stellt sich aber die Frage, wie komplett das Artenspektrum in den Tonaufzeichnungen widerspiegelt wird. Ein Vergleich der Ergebnisse von Punkt-Stopp-Zählungen, die im Amazonasgebiet durchgeführt wurden, mit parallel dazu erstellten Tonaufzeichnungen ergab, dass mit Hilfe von Tonaufzeichnungen mehr Arten erfasst werden (Haselmayer & Quinn 2000). Die Aufnahmen erfolgten dabei mit einem Richtmikrophon (Sennheiser ME 66), das während der 10 minütigen Aufzeichnung jeweils um 90 Grad gedreht wurde. Nicht mittels Tontechnik erfasste Arten wurden entweder im Feld nur durch Sichtbeobachtung bestätigt oder hatten unauffällige Lautäußerungen. Seltene Arten wurden hingegen eher direkt vor Ort registriert als später auf den Tonaufzeichnungen detektiert. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist aber zu berücksichtigen, dass in den Tropen im Gegensatz zur gemäßigten Zone, ein Großteil der Vogelarten nicht von relativ konstanten Singwarten aus singt.

Bei Einsatz eines hoch empfindlichen omnidirektionalen Mikrophons (River Fork Compression Zone Microphone CVX-360) fanden Hobson et al. (2002) 83 bis 97 % Übereinstimmung im Spektrum der Arten, die sie während der Aufzeichnung in den borealen Mischwä-

ldern des mittleren Saskatchewan und westlichen Ontario (USA) im Feld gehört hatten und der Artenanzahl, die sie später auf den Aufnahmen gefunden hatten. Die Reichweite der Tonaufzeichnungen war vergleichbar mit der Leistung des menschlichen Gehörs. Einen Vorteil von Tonaufzeichnungen sahen die Autoren der Studie darin, dass die Tonaufzeichnungen von Nichtspezialisten erstellt werden und die Auswertungen später von erfahrenen Ornithologen im Labor vorgenommen werden können.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse einer Punkt-Erfassung mit der zeitgleichen Aufzeichnung mittels einer autonomen Aufzeichnungseinheit fanden Hutto & Stutzmann (2009) in Bezug auf das Artenspektrum in Wald- und Feuchtgebieten in Montana (USA) eine deutlich geringere Übereinstimmung. Dabei wurden von einem erfahrenen Ornithologen lediglich 52,3 % der Arten sowohl vor Ort als auch auf den Aufzeichnungen detektiert, 35,6 % wurden nur vor Ort gefunden und 12,1 % nur auf den Aufzeichnungen. Die Hauptursache für die niedrige Erfassungsrate der akustischen Aufzeichnung sahen die Autoren in der zu niedrigen Empfindlichkeit der Mikrophone. Ein weniger erfahrener Ornithologe fand nur 45 % der Arten sowohl auf den Aufzeichnungen als auch im Feld. Es wurde dabei auch deutlich, dass im Feld ein nicht unerheblicher Anteil von Arten überhört wurde.

Frommolt et al. (2008) verglichen die Anzahl der auf Vierkanal-Tonaufzeichnungen gefundenen Vogelarten mit den Ergebnissen einer zeitgleich im Rahmen des DDA-Monitorings häufiger Brutvogelarten durchgeführten Linienkartierung auf einer 50 ha großen Fläche bestehend aus Mischwald und Riedgrasbeständen. Von 37 im Rahmen der Kartierung erfassten Arten wurden 32 auch auf den Tonaufzeichnungen gefunden. Auf den Tonaufzeichnungen wurden 13 weitere Arten entdeckt. Ein großer Teil davon war jedoch offensichtlich nur als Nahrungsgast auf der Fläche. Ebenfalls mit Vierkanaltechnik arbeiteten Celis-Murillo et al. (2009). Für die Auswertung der Tonaufzeichnungen wurde hier ein quadrophonischer Ansatz gewählt. Die Aufzeichnungen erfolgten in nordamerikanischen Auwaldbiotopen mit vier Mikrophonen, die durch Trennwände akustisch voneinander getrennt waren. Für die Auswertung erfolgte die Tonwiedergabe in einer quadratischen Kammer mit je einem Lautsprecher in jeder Ecke. Die Anzahl der Arten, die durch Abhören der Aufzeichnungen bzw. durch Erfassung vor Ort bestimmt wurden, war zwar nahezu identisch, die Übereinstimmung im Artenspektrum jedoch relativ gering (nur 59 bis 60 %). Seltene Arten wurden eher durch Abhören gefunden. Trotz unterschiedlicher Ergebnisse der einzelnen Studien kann festgestellt werden, dass bei Verwendung von empfindlichen Mikrophonen mit einer Tonaufzeichnung die gleiche Reichweite erzielt werden kann, wie mit unserem menschlichen Gehör.

Quantitative Erfassung auf der Grundlage von Tonaufzeichnungen

Neben der Anzahl der Arten ist für Erfassungszwecke auch meist deren Häufigkeit erforderlich. Stereo- bzw. quadrophonische Aufzeichnungen erlauben es, einen räumlichen Eindruck der Geräuschkulisse wiederzugeben und eröffnen dadurch die Möglichkeit, allein durch Abhören auch eine Abschätzung der Anzahl rufender Tiere vorzunehmen (Rempel et al. 2005; Celis-Murilo et al. 2009).

Eine weitere Möglichkeit für die Bestimmung der Anzahl rufender Tiere könnte in der Nutzung individueller Merkmale in der Stimme zur Unterscheidung einzelner Individuen bestehen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Merkmale zumindest für den Erfassungszeitraum stabil genug sind und sich klar voneinander unterscheiden.

Gilbert & McGregor (1994) haben als erste die Individualität der Rufe von Rohrdommeln (*Botaurus stellaris*) und Prachtauchern (*Gavia arctica*) für Bestandsaufnahmen genutzt. Einzelne Individuen konnten dabei auf der Grundlage der visuellen Bewertung von Spektrogrammen unterschieden werden. Seit 1990 wurden zum Monitoring der (sehr kleinen) britischen Rohrdommelpopulation systematisch Tonaufzeichnungen herangezogen (Gilbert et al. 2002).

Anhand akustischer Merkmale in den Duetten konnte Weßling (2000) Revier- und Partnertreue von Kranichen (*Grus grus*) über mehrere Jahre dokumentieren. Die Stabilität akustischer Merkmale wurde dabei einfach vorausgesetzt.

An fünf gekäfigten Uhus (*Bubo bubo*) belegte Lengagne (2001) die Konstanz von Parametern der Stimme über zwei Folgejahre. In einer Untersuchung an Bartkäuzen (*Strix nebulosa*) in Kalifornien konnten mittels einer kanonischen Diskriminanzanalyse 92,8 % der Rufe den richtigen Individuen zugeordnet werden, wenn die Aufnahmen aus der gleichen Saison stammten (Rognan et al. 2009). Wenn Aufnahmen aus unterschiedlichen Jahren genutzt wurden, waren es nur noch 71,4 %.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Kirschel et al. (2011) für Mexikoameisendrosseln (*Formicarius moniliger*). Gesänge von 14 Individuen wurden mittels kanonischer Diskriminanzanalyse zu 88,9 % dem richtigen Tier zugeordnet.

Am Beispiel des Eistauchers (*Gavia immer*) konnten Walcott et al. (2006) auch deutliche Änderungen in Stimmparametern einzelner Individuen belegen. An einer mit Farbringen markierten Population fanden sie, dass der Revierruf deutliche Merkmale aufweist, die zur Individualerkennung genutzt werden können. Gleichzeitig verweisen die Autoren auf Veränderungen im Ruf über mehrere Jahre. Insbesondere ein Wechsel des Territoriums ging mit einer deutlichen Änderung der akustischen Struktur einher. Bei 12 von 13 untersuchten Tieren änderte sich die Rufstruktur deutlich nach einem Wechsel des Territoriums.

Es sei vermerkt, dass für die Untersuchungen zur Individualität der Stimme stets qualitativ gute, mit Richtmikrophonen erstellte Aufnahmen verwendet wurden. Bisher fehlt noch der Nachweis, dass dieses Merkmal für die Ermittlung der Anzahl rufender Individuen auf der Grundlage von Tonaufzeichnungen autonomer Einheiten, wo der Signal-Rausch-Abstand in der Regel deutlich schlechter ist, geeignet ist.

Auch die Anzahl aufgezeichneter Rufe oder Gesangstrophen könnte als Maß für die Anzahl der Tiere herangezogen werden. Diese Methode wird u. a. bei der mehr oder weniger automatisierten Erfassung des Vogelzuges genutzt (Dierschke 1989; Farnsworth & Russel 2007; Hill & Hüppop 2008; Hüppop & Hilgerloh 2012; Hüppop et al. 2012). Ein Rückschluss auf die absolute Anzahl der Tiere ist aber schwierig, da verschiedene Arten unterschiedlich häufig rufen und auch innerhalb einer Art die Rufrate stark von den jeweiligen Umweltbedingungen abhängt (Farnsworth et al. 2004; Farnsworth 2005; Hüppop & Hilgerloh 2012). Trotzdem sind Rufrate und Zugintensität nach Radarmessungen manchmal gut korreliert, die Rufrate also dann ein gutes Maß für die Zugintensität (Larkin et al. 2002; Farnsworth et al. 2004).

Buxton & Jones (2012) fanden, dass die Rufaktivität nachtaktiver in Höhlen brütender Seevögel zumindest relative Angaben zur Bestandsdichte liefern kann. Im Rahmen eines Methodenvergleichs zur quantitativen Erfassung der Reviere von Singvögeln zeigte Buckland (2006) jedoch, dass eine Erfassung über die Anzahl registrierter Gesangstrophen recht ungenau ist. Trotzdem ist es denkbar, dass für bestimmte Arten die Rufaktivität ein zuverlässiger Indikator für Bestandsdichten sein kann. Für Säugetiere wurde am Beispiel des Waldelefanten (*Loxodonta africana cyclotis*) gezeigt, dass die Anzahl der Rufe pro Zeiteinheit als ein zuverlässiges Kriterium für die Populationsgröße genutzt werden kann (Thompson et al. 2009a). Die Anwendung des Kriteriums setzt aber voraus, dass die Rufaktivität relativ konstant ist. Dank der extrem hohen Reichweite der Rufe der Elefanten kann mit einem einzelnen akustischen Sensor eine Fläche von 3,22 km² erfasst werden (Thomson et al. 2009b). Eine so große Reichweite ist aber zumindest im terrestrischen Bereich eher die Ausnahme.

Mikrophonarrays und akustische Ortung

Eine zeitgleiche Erfassung der Rufe mit mehreren Mikrophonen, sogenannten Mikrophonarrays, erlaubt eine Ortung der Schallquelle auf der Grundlage der unterschiedlichen Ankunftszeiten der akustischen Signale an den einzelnen Mikrophonen. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die Anzahl rufender Tiere vergleichbar der klassischen Revierkartierung über den Rufort zu bestimmen.

In Landlebensräumen wurden Mikrophonarrays in erster Linie für verhaltensbiologische Untersuchungen

eingesetzt (Blumstein et al. 2011). Die Untersuchungsfläche war dabei in den meisten Fällen nicht größer als $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$. Während bei der Ortung von Meeressäugern die drei Dimensionen des Raumes unbedingt zu berücksichtigen sind, ist für die meisten feldornithologischen Fragestellungen eine Reduktion auf zwei Dimensionen möglich. Dabei gibt es prinzipiell zwei Ansätze zur Ortung von Schallquellen: Mit drei räumlich getrennten Mikrofonen kann die Ortung über Hyperbelfunktionen erfolgen (Abb. 1 a; z. B. Wahlberg et al. 2003). Dabei sind die einzelnen Mikrofone weiter voneinander entfernt. Dieses Verfahren setzt voraus, dass die Aufzeichnung der einzelnen Tonspuren zeitlich synchron erfolgt. Die einfachste Variante dafür ist, dass die Mikrofone mit langen Kabeln an einen Mehrkanalrecorder angeschlossen sind. Wenn der Abstand der Schallquelle, also des rufenden Tieres, gegenüber dem Abstand der Membranen eines Mikrofonpaares sehr groß ist, kann für die Bestimmung der Schalleinfallrichtung alternativ eine einfache trigonometrische Funktion genutzt werden, die u. a. auch für das Richtungshören des Menschen gilt (Borucki 1989 und Abb. 1 b). Für die Ortung werden dann zumindest zwei Mikrofonpaare benötigt. Der Ort der Schallquelle wird

über den Schnittpunkt der beiden Schalleinfallsgerechten bestimmt. Zu beachten ist aber, dass es hier eine spiegelsymmetrische Lösung gibt. Ohne a priori Kenntnis des ungefähren Ortes sind zumindest drei Mikrofonpaare erforderlich.

Bereits in den 1970er Jahren haben Magyar et al. (1978) mit Hilfe eines Vierkanalrecorders Virginia-wachteln (*Colinus virginianus*) im Rahmen von Verhaltensexperimenten akustisch lokalisiert. Die Rufe der Vögel wurden mit einem Aufbau aus vier Mikrofonen, die über Kabel mit einem Vierkanalrecorder verbunden waren aufgezeichnet. Fitzsimmons et al. (2008) haben eine kabelgebundene Anordnung von 16 Mikrofonen für Playback-Experimente an Schwarzkopfmäusen (*Peromyscus atricapilla*) genutzt.

Die wohl erste Untersuchung zur Nutzung von Lokalisationsalgorithmen zur Bestimmung von Bestandsgrößen wurde von Wahlberg et al (2003) an Rohrdornmeln durchgeführt. Mit einer Anordnung aus vier Mikrofonen, die 65 bis 294 m voneinander entfernt standen, konnten auf einer Fläche von ca. 65 ha 6 rufende Männchen lokalisiert werden. Systematisch wurde die Methodik der akustischen Lokalisation von Frommolt & Tauchert (2010 a, b) für die Bestandser-

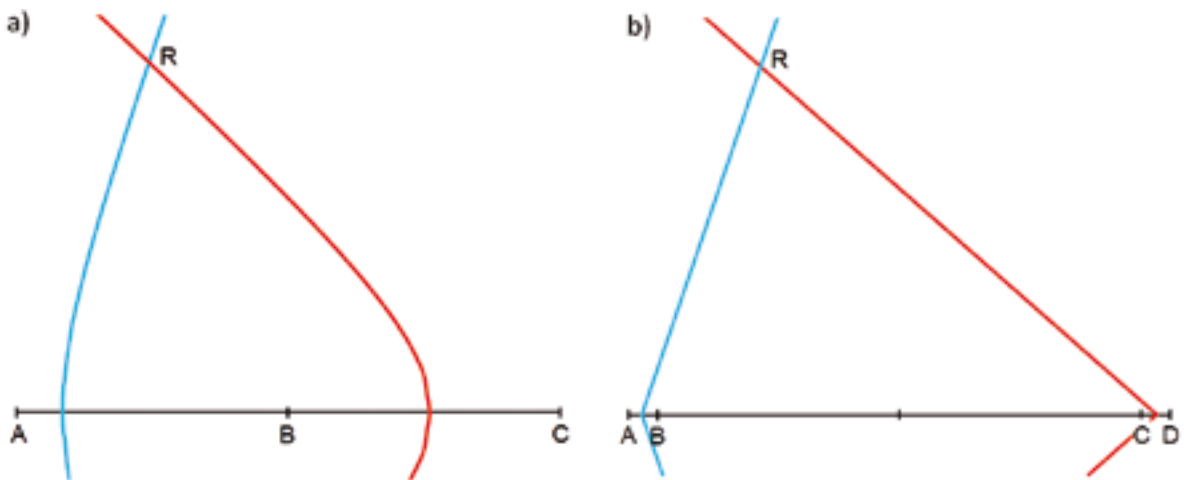


Abb. 1: Zwei Möglichkeiten zur Ortung von Schallquellen in der Ebene. a) Bestimmung der „Schalleinfallrichtung“ auf der Grundlage der Laufzeitunterschiede des akustischen Signals an entfernten Einzelmikrofonen (Hyperbelfunktion). Blau ist die Isolinie für einen beispielhaft gewählten Laufzeitunterschied zwischen den Mikrofonen A und B, rot die Isolinie für einen solchen zwischen den Mikrofonen B und C dargestellt. Die Schallquelle R befindet sich am Schnittpunkt der beiden Isolinien. b) Vereinfachte trigonometrische Ortung einer weit entfernten Schallquelle R auf der Grundlage der Laufzeitunterschiede des akustischen Signals an zwei Mikrofonpaaren A-B (blaue Gerade) und C-D (rote Gerade). Bei der gewählten Anordnung ist in beiden Fällen eine spiegelsymmetrische Lösung (jeweils nach unten angedeutet) denkbar. – Two approaches for locating sound sources in the plane. a) Determination of "sound incidence direction" on the basis of time differences of arrival of the acoustic signal at distant microphones (hyperbolic approach). The blue line is the isoline for an arbitrarily chosen difference of sound arrival times at microphones A and B, the red line those for the difference of arrival time measured at microphones B and C. The source of sound R is located at the intersection point of the two isolines. b) Simplified trigonometric localisation a distant source of sound on the basis of time differences of signal arrival at two pairs of microphones A-B (blue line) and C-D (red line). In both configurations a mirror-symmetric solution (indicated) is possible.

fassung von Rohrdommeln genutzt. In drei aufeinanderfolgenden Jahren konnten dabei auf einer Fläche von ca. 400 ha mindestens 10 bzw. 17 rufende Individuen festgestellt werden.

Bei der Aufzeichnung mit autonomen Recordern ohne direkte Kabel- oder ähnliche Verbindung ist die Synchronisation der Aufzeichnungsgeräte entscheidend. Möhl & Wahlberg (2001) haben ein System entwickelt, welches das GPS-Signal zur Synchronisation nutzt. Bei der Untersuchung von Frommolt & Tauchert (2010 a, b) wurde vor Beginn der Aufzeichnungen auf alle Digitalrecorder zeitgleich ein Synchronisationssignal aufgezeichnet, wobei eine Nachjustierung mit Hilfe eines akustischen Signals einer bekannten Schallquelle erforderlich war. Ein UKW-Signal zur Synchronisation von DAT-Recordern haben Hayes et al. (2000) genutzt.

Sowohl GPS-Signale als auch Funksignale setzen voraus, dass diese auch störungsfrei empfangen werden können. Unter einer geschlossenen Baumkrone und insbesondere in tropischen Regenwäldern ist dies meist nicht gegeben. Für Untersuchungen an Mexikoameisendrosseln im mexikanischen Regenwald haben Collier et al. (2010) ein sich selbst justierendes System bestehend aus 32 Mikrofonen, das acht Einheiten mit jeweils vier Mikrofonen beinhaltet, entwickelt. Die Synchronisation der Recorder erfolgte über akustische Signale, die von den Erfassungseinheiten gesendet wurden.

Bei der Nutzung von Lokalisationsalgorithmen ist unbedingt zu beachten, dass die Genauigkeit vor allem davon abhängt, wie genau die Schallgeschwindigkeit sowie Windstärke und Windrichtung bestimmt werden kann (Spiesberger & Fristrup 1990). Die Schallgeschwindigkeit hängt von Lufttemperatur, -druck und -feuchtigkeit ab. Luftschichtungen und Temperaturgradienten haben insbesondere bei Messungen über große Distanzen einen nicht unwesentlichen Einfluss. Auch Habitat und Lauttyp haben einen Einfluss auf die Genauigkeit der Lokalisation (McGregor et al. 1997).

Akustische Analyse und Mustererkennung

Die Visualisierung akustischer Aufzeichnungen mit Hilfe von Spektrogrammen (früher auch Sonagramme genannt) erleichtert die Sichtung von Tonaufzeichnungen. Beispiele verfügbarer Software sind etwa GlassOfFire (<http://www.oldbird.org/glassofire.htm>) oder Raven (<http://www.birds.cornell.edu/brp/raven/RavenOverview.html>). GlassOfFire bietet wenige Einstellmöglichkeiten und ist auch bei der ersten Anwendung zunächst gewöhnungsbedürftig, da die Software nur rudimentär per graphischer Benutzerführung bedient wird. Bei großen Mengen kurzer Dateien etwa mit Zugrufen und etwas Einarbeitungszeit erweist sich das Programm als große Hilfe bei der Sortierung der durch Spektrogramme visualisierten Dateien. Raven bietet dagegen zumindest in der kostenpflichtigen Pro-Version sehr viele individuelle Änderungsmöglichkeiten an. Audio-dateien werden bei Raven nahtlos aneinander gereiht

und interessante Energieakkumulationen im Spektrum können optisch leicht erfasst werden. Uninteressante und immer wiederkehrende Störgeräusche können mit einiger Übung am Spektrogramm erkannt und schon vor dem Abhören übersprungen werden. Das Nutzerhandbuch ist umfangreich und setzt dabei auch einige Grundlagen beim Anwender voraus, wenngleich mit Hilfe von mitgelieferten Beispieldateien schnell ein Einstieg in die Menüführung möglich ist. Ein Online-Forum hilft häufig binnen kurzer Zeit bei speziellen Fragen weiter. Auch die automatische Detektion über selbst zu definierende Parameter ist möglich.

Bei gezielter Suche nach einzelnen Arten ist die Visualisierung mit Hilfe von Spektrogrammen bedeutend effektiver als das reine Abhören der Aufzeichnungen. So benötigten Swiston & Menill (2009) für die Sichtung von 24 Stunden Tonmaterial auf Rufe von Helmspechten (*Dryocopus pileatus*) und Elfenbeinspechten etwas mehr als eine Stunde. Die Suche nach dem Doppelklopfen des Elfenbeinspechts dauerte mit gut zwei Stunden etwas länger.

Mehrspeuraufzeichnungen erlauben, selbst bei sehr ähnlicher Rufstruktur oftmals einzelne Individuen sicher auseinanderzuhalten und ermöglichen damit quantitative Aussagen (Abb. 2).

Wie bereits gezeigt, können Langzeitaufzeichnungen das Artenspektrum singender und rufender Vögel gut dokumentieren. Eine Bestimmung durch Abhören der Aufzeichnungen durch erfahrene Ornithologen bleibt immer noch sehr zeitaufwändig. Daher sind Algorithmen der akustischen Mustererkennung gefragt, die eine Art sicher im Stimmengewirr erkennen können.

Ein naheliegender Ansatz zur Mustererkennung von Tierstimmen ist es, Verfahren aus der Spracherkennung auf dieses Problem zu übertragen. Solche Ansätze wurden schon früh verfolgt, um Elemente des Gesangs von Vögeln zu erkennen. In diesem Zusammenhang wurden klassische Methoden wie Dynamic Time Warping und Hidden-Markov-Modelle (HMMs) angewandt (Kogan & Margoliash 1998; Brandes 2008). Die in der Spracherkennung sehr erfolgreichen Methoden lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf das Mustererkennungsproblem für Tierstimmen übertragen. Dies liegt vor allem an drei Eigenschaften dieser Methoden. Erstens sind die für die Spracherkennung verwendeten Audiomerkmale spezifisch auf menschliche Sprache abgestimmt. Insbesondere bieten sie für diejenigen Frequenzbereiche, die für Vogelstimmen bedeutsam sind, geringe Sensitivität. Zweitens sind sie sehr anfällig gegenüber Hintergrundgeräuschen, die vor allem bei Freilandaufnahmen von Vogelstimmen eher die Regel als die Ausnahme darstellen. Drittens gehen die in diesem Zusammenhang verwendeten Signalmodelle (HMMs) davon aus, dass die Signale lokal-stationär sind, d. h. dass sich ihre Merkmale zeitlich lokal gut durch einen Mittelwert approximieren lassen. Dies trifft auf die menschliche Sprache zwar

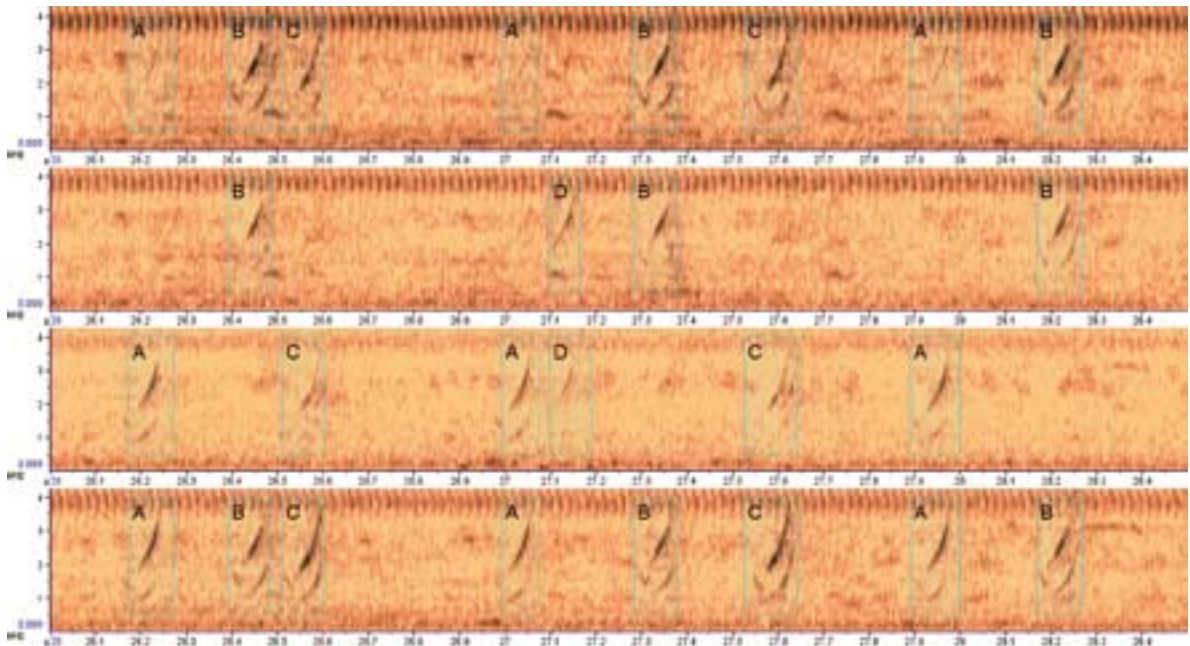


Abb. 2. Spektrogramm einer Vierkanalaufzeichnung der Rufe von Tüpfelsumpfhühnern (*Porzana porzana*). Buchstaben kennzeichnen einzelne Individuen. – *Spectrogram of a four-channel recording of Spotted Crake (Porzana porzana) calls. Capital letters indicate different individuals.*

näherungsweise zu, auf die meisten Vogelstimmen jedoch nicht.

Zum Teil dürften sich diese Probleme durch speziell für Tierstimmen entworfene Audiomerkmale mildern lassen. Eine direkte Übertragung von Methoden aus der Spracherkennung auf die Mustererkennung in Felddaufnahmen ist jedoch ohne umfangreiche Anpassungen nicht möglich.

In den letzten Jahren wurden insbesondere für Musikdatenbanken Algorithmen für ein inhaltsbasiertes „Retrieval“ entwickelt, die es erlauben, auf der Grundlage von akustischen Mustern auch große Soundarchive nach bestimmten Sequenzen schnell zu durchsuchen. Die Anwendung solcher Algorithmen wurde bisher nur ansatzweise für Tierstimmenarchive durchgeführt. Bardeli (2009) hat unter Nutzung von Aufzeichnungen aus dem Tierstimmenarchiv des Museums für Naturkunde Berlin die prinzipielle Möglichkeit gezeigt, mittels einer auf Parameterextraktion basierenden Ähnlichkeitssuche einzelne Tierstimmen mit Sicherheit zu erkennen. Gute Trefferquoten wurden dabei bei Gesängen erzielt, die vornehmlich aus klanghaften Elementen aufgebaut waren, wohingegen bei geräuschhaften Signalen noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt wurden.

Eine für die Detektion bioakustischer Signale häufig genutzte Methode ist die Spektrogrammkorrelation, die u. a. auch in die Analysesoftware Avisoft SASLab Pro (www.avisoft.com) integriert ist (Abb. 3). Ausgangs-

punkt für den Vergleich sind mit Hilfe der schnellen Fouriertransformation (FFT) berechnete Spektrogramme. Diese numerischen Spektrogramme stellen eine Matrix von Amplitudenwerten in der Zeit- und Frequenzdimension dar. Für die Korrelation werden die berechneten Spektrogramme schrittweise entlang der Zeitachse verschoben und jeweils ein Korrelationskoeffizient Φ_{xy} nach folgender Formel berechnet (Avisoft Bioacoustics 2012):

$$\Phi_{xy} = \frac{\sum_x \sum_y ((a_{xy} - m_a) \times (b_{xy} - m_b))}{\sqrt{\sum_x \sum_y (a_{xy} - m_a)^2 \times \sum_x \sum_y (b_{xy} - m_b)^2}}$$

Dabei sind m_a und m_b die Mittelwerte aller für die Spektrogramme a und b errechneten Amplitudenwerte. a_{xy} und b_{xy} sind jeweils die Einzelwerte für die Amplituden der Spektrogramme a und b zum Zeitpunkt x für die Frequenz y. Der Maximalwert der so bestimmten Korrelationskoeffizienten repräsentiert die Übereinstimmung der Rufe innerhalb der beiden Spektrogramme. Je größer dieser maximale Korrelationskoeffizient ist, umso größer ist die Ähnlichkeit der Rufe. Identische Spektrogramme ergeben einen Korrelationskoeffizienten von 1. Durch Hinzufügen von zusätzlichen Referenz-Spektrogrammen, die eine möglichst große Bandbreite der zu erwartenden Rufvariationen umfassen sollten, kann die Erkennungsrate weiter erhöht werden.

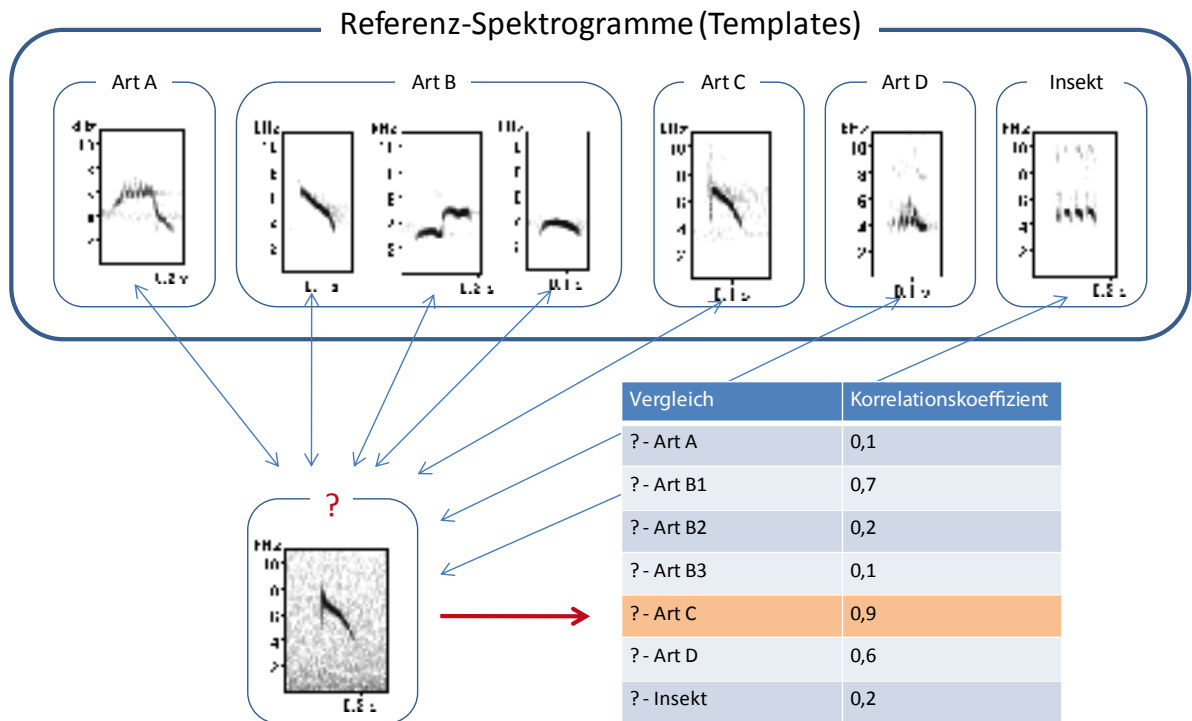


Abb. 3: Funktionsschema der Spektrogrammkorrelation. Große Ähnlichkeiten in den Spektrogrammen spiegeln sich in einem hohen Korrelationskoeffizienten wieder. - *Functional diagram of spectrogram correlation. Great similarities in the spectrograms are reflected in a high correlation coefficient.*

Abbildung 4 zeigt am Beispiel der Rufe des Tüpfelsumpfhuhnes, wie mit Hilfe einer Spektrogrammkorrelation arttypische Rufe in einer Langzeitaufzeichnung gefunden werden können. Die Methodik ist gut geeignet, um nach einfachen Strukturen, wie z. B. Rufen zu suchen. Weniger geeignet ist sie für komplexe Gesänge.

Von der Firma Wildlife Acoustics wurde eine Software (Song Scope) entwickelt, die es erlaubt auf der Grundla-

ge von Hidden-Markov-Modellen sowohl Rufe als auch Gesänge in Langzeitaufzeichnungen zu detektieren (Agranat 2009). Ausgangspunkt ist dabei das Trainieren des Erkennungsalgorithmus durch bekannte Lautäußerungen. Das Programm liefert gute Ergebnisse, wenn sich die Gesänge bzw. Rufe klar vom Hintergrund abheben (Agranat 2007). Nachteilig ist jedoch, dass der Prozess des Trainierens oft sehr zeitaufwändig ist und im Ender-

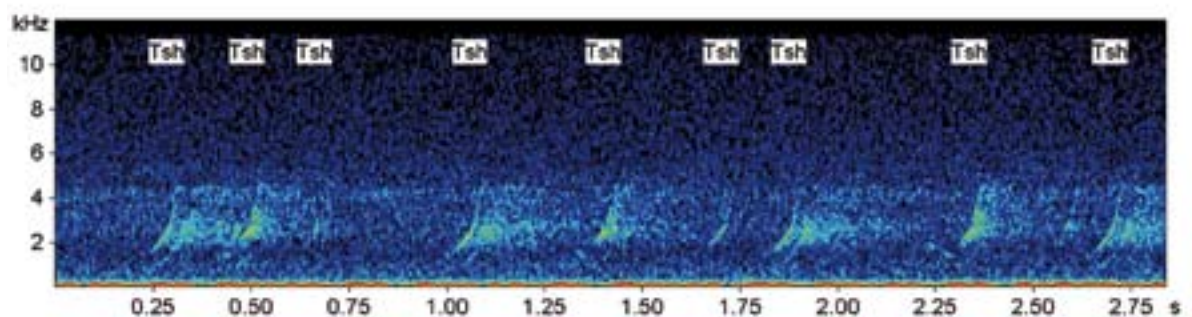


Abb. 4: Detektion der Rufe des Tüpfelsumpfhuhns (*Porzana porzana*) in einem Ausschnitt einer Langzeitaufzeichnung unter Nutzung der Spektrogrammkorrelation in Avisoft SASLab Pro. Detektierte Rufe sind mit Tsh gekennzeichnet. - *Detection of Spotted Crake (*Porzana porzana*) calls in a sequence of a long-term recording using the spectrogram correlation algorithm of Avisoft SASLab pro. Detected calls are labelled with Tsh.*

gebnis nicht gezeigt wird, welche Parameter konkret für die jeweilige Arterkennung herangezogen wurden.

Ziel der Mustererkennung ist es, möglichst viele Rufe bzw. Gesänge sicher zu detektieren. Dabei sollte sowohl die Anzahl der falsch positiven Ereignisse (Fehlbestimmung) und falsch negativen Ereignisse (Nichterkennen) gering gehalten werden. Oft muss dabei ein Kompromiss eingegangen werden. Wenn es darum geht, eine Art sicher zu bestimmen, sollte die Anzahl der falsch positiven Ereignisse minimiert werden. Wenn es jedoch darum geht, seltene Rufereignisse zu finden, sollte eher die Anzahl falsch negativer Ereignisse gering gehalten werden (Waddle et al. 2009). Eine Nachkontrolle ist meist unverzichtbar. So haben Goyette et al. (2011) die Spektrogrammkorrelation genutzt, um in Daueraufzeichnungen Rufe von neotropischen Eulen zu detektieren. Auch hier war die automatische Auswertung lediglich ein Hilfsmittel, die endgültige Entscheidung erfolgte durch Spezialisten. Swiston & Menill (2009) verglichen die Effektivität der Spektrogrammkorrelation mit dem visuellen Scannen von Spektrogrammen anhand von Langzeitaufzeichnungen dreier amerikanischer Spechtarten (Helmspecht, Königsspecht *Campephilus guatemalis* und Elfenbeinspecht). Dabei hat die visuelle Inspektion von Spektrogrammen die sichersten Ergebnisse erbracht.

Die Effektivität von Mustererkennungsalgorithmen wurde von Waddle et al. (2009) am Beispiel von drei Froscharten unter Nutzung der Software Song Scope (Wildlife Acoustics) getestet. Mit dem Bestreben, die Anzahl falsch positiver Ereignisse gering zu halten, er-

gaben die Analysen 2,7 bis 15,8 % Fehlbestimmungen und 45 bis 51 % nicht erkannte Rufe. Buxton and Jones (2012) nutzten die gleiche Software zur Erfassung von Rufen von Wellenläufern (*Oceanodroma furcata*, *O. leucorhoa*) und Silberalken (*Synthliboramphus antiquus*) bei einer Rate von 29 bis 54 % nicht erkannter Rufe. Bei starker Überlappung von Rufen mehrerer Arten wurden jedoch nur 10 % der Rufe erkannt.

Neben generellen Mustererkennungsalgorithmen können gezielt auf einzelne Arten abgestimmte Verfahren insbesondere in Situationen mit hohem Hintergrundpegel gute Ergebnisse erzielen. Hill & Hüppop (2008) beschreiben ein Verfahren zur automatischen Detektion von Rufen der Rotdrossel (*Turdus iliacus*) in einer großen Zahl von Dateien, die mittels der Registrierungssoftware AROMA (s. o.) aufgezeichnet wurden. Die Rufsuche wurde per Skript in einer für die Phonetik entwickelten und frei verfügbaren Software (<http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>) realisiert. Ein Ruf wurde dabei als Rotdrosselruf klassifiziert, wenn im Frequenzbereich von 6.200 bis 8.500 Hz die Bandbreite des Formanten für mindestens 130 ms weniger als 50 Hz betrug und zudem die Frequenz des Formanten signifikant linear über die Rufdauer abnahm (ein Formant beschreibt die Konzentration der akustischen Energie in einem bestimmten Frequenzbereich).

Für die Rohrdommel und den Rohrschwirl (*Locustella luscinioides*) wurden Detektionsalgorithmen entwickelt, die es erlauben, die Art auch in Aufzeichnungen mit starken Hintergrundgeräuschen zu erkennen (Bardeli et al 2010). Beim Rohrschwirl wurden

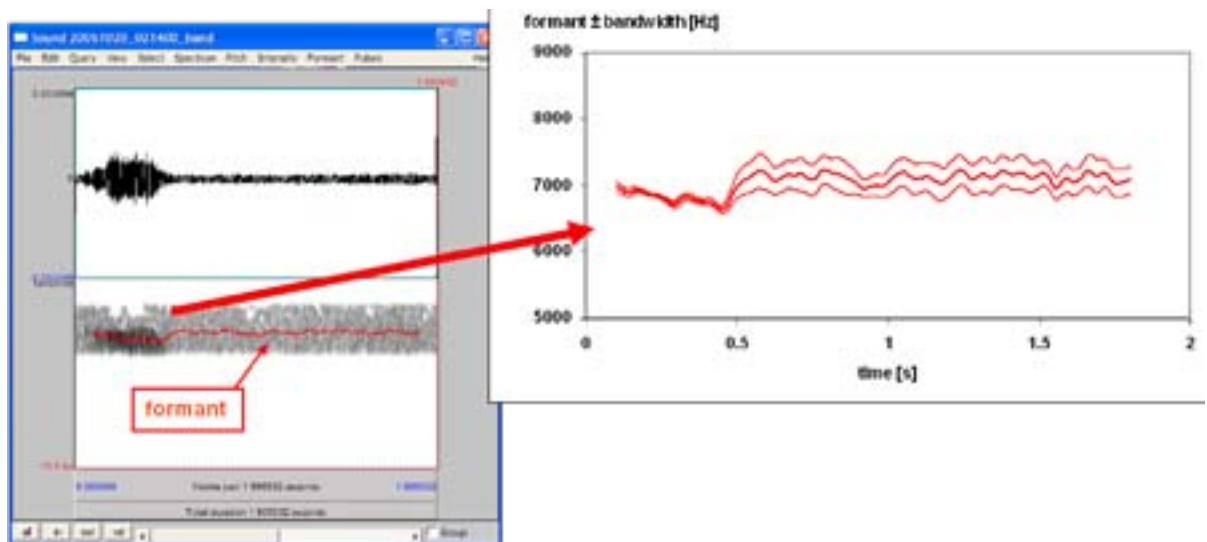


Abb. 5: Formant des Zugrufs einer Rotdrossel im Frequenzbereich 6200 bis 8500 Hz (Darstellung in Praat). – *Formant of a flight call of a Redwing (Turdus iliacus) in the frequency band from 6,200 to 8,500 Hz as displayed in the free phonetic software "Praat".*



Abb. 6: Erfassung des Rohrschwirls von einem langsam fahrenden Boot aus. – *Mapping of Savi's Warbler (Locustella luscinioides) from a slowly moving boat.*

Foto: K.-H. Frommolt

auf Tonaufzeichnungen durchschnittlich 92 % aller Gesänge der Art detektiert, mit lediglich 1,2 % Fehlinterpretationen. Unter Nutzung des Erkennungsalgorithmus für den Rohrschwirl wurde der Versuch unternommen, eine Linienkartierung mit rein akustischen Methoden zu realisieren (Frommolt et al. 2008; Koch et al. 2008). Dafür wurde die Schilfkante eines Gewässers mit einem Boot langsam abgefahren (Abb. 6). Während der Fahrt erfolgte eine kontinuierliche Aufzeichnung von Ton und GPS-Position. Parallel dazu wurden singende Individuen direkt vor Ort kartiert. Hinsichtlich der Anzahl der ermittelten Reviere wurde dabei eine gute Übereinstimmung zwischen den mittels Linienkartierung vor Ort und der auf akustischem Weg ermittelten Ergebnisse festgestellt (Abb. 7). Gewisse Abweichungen waren bei der Lage der Reviere zu erkennen.

Auch Towsey et al. (2012) kamen zu dem Schluss, dass es kaum einen einheitlichen Algorithmus zur Erkennung von Tierstimmen geben wird. Die von ihnen entwickelte Toolbox zur Stimmdetektion enthält eine Kombination verschiedener Methoden.

Indices für Artendiversität

Die Möglichkeit, innerhalb kurzer Zeit sehr umfangreiches akustisches Datenmaterial zu sammeln, wirft die Frage einer effektiven Auswertung auf. Zu diesem Zweck wurden Indices entwickelt, welche die Biodiversität allein auf der Grundlage von Tonaufzeichnungen beschreiben sollen.

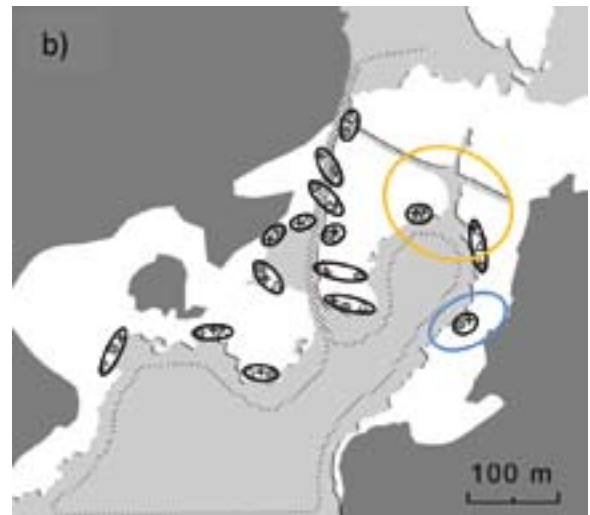
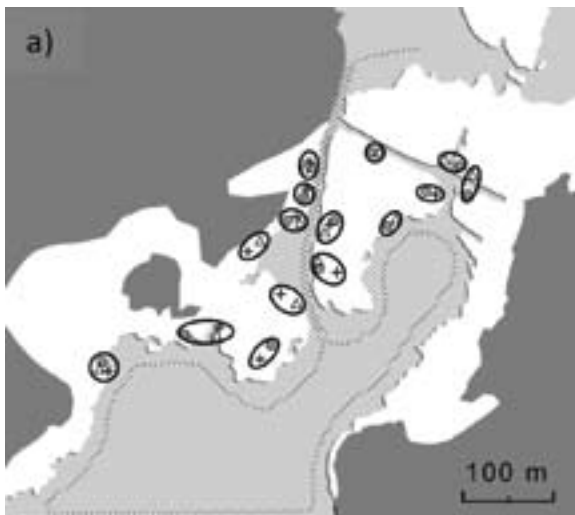


Abb. 7: Ergebnisse der Erfassung des Rohrschwirls am Parsteiner See 2009. a) Bestimmung der Reviere durch Kartierung vor Ort. b) Bestimmung der Reviere auf der Grundlage einer kontinuierlichen Tonaufzeichnung unter Einsatz eines Mustererkennungsalgorithmus. Die Ortsbestimmung erfolgte anhand der aufgezeichneten GPS-Route. Gelb umrandet ist ein Gebiet, das mittels Mustererkennung schwer zu erfassen war, blau umrandet ein Revier, das vom Beobachter vor Ort übersehen wurde. – *Mapping of Savi's Warbler (Locustella luscinioides) at lake Parsteiner See in 2009. a) Determination of the territories by direct mapping. b) Determination of territories by continuous sound recording using a pattern recognition algorithm. The location of the boat was determined on the basis of the recorded GPS track. Yellow bordered is an area that was difficult to assess using pattern recognition algorithms. Blue outlined is a territory that was overlooked during direct observation.*

Sueur et al. (2008) haben einen akustischen Entropie-Index zur Beschreibung der akustischen Diversität vorgeschlagen, der auf informationstheoretischen Ansätzen beruht. Damit soll eine schnelle Bewertung der Komplexität der Zusammensetzung von Tiergemeinschaften ermöglicht werden. Auf diese Weise können generelle Veränderungen in Lebensgemeinschaften schnell aufgezeigt werden, jedoch nicht, welche Arten konkret betroffen sind. Eine Überprüfung der Anwendbarkeit auf Wälder der gemäßigten Zone erfolgte durch Depretere et al. (2012), wobei Hinweise gefunden wurden, dass dieser auf der Grundlage der Bewertung der Geräuschkulisse berechnete Index mit der Artenmannigfaltigkeit (Anzahl der Arten, die auf den Aufnahmen zu hören waren) korreliert. Bei Betrachtung der Ergebnisse entsteht jedoch der Eindruck, dass bei sieben und mehr singenden Arten keine weitere Zunahme des Entropie-Indexes erfolgt.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Pieretti et al. (2011) und Farina et al. (2011) mit einem Index der akustischen Komplexität. Dieser Index basiert darauf, dass die meisten Lautäußerungen von Tieren aus kurzen Elementen bestehen. Bewertet wird hier die zeitliche Änderung innerhalb der einzelnen Frequenzbänder. Dieser Index ist anscheinend gut geeignet, um die Aktivitätsphasen bestimmter Artengruppen innerhalb von Langzeitaufzeichnungen zu erkennen (Farina et al. 2011).

Diskussion

Aus unserer Übersicht wird deutlich, dass wir von einer kompletten automatisierten Erfassung und Auswertung zwar noch weit entfernt sind, automatisierte akustische Verfahren aber ein riesiges Potenzial für ornithologische Feldforschungen verschiedenster Art haben. Für die meisten Aufgaben einer kontinuierlichen Bestandserfassung ist zu erwarten, dass auch in Zukunft traditionelle Erfassungsmethoden wie die Linienkartierung oder die Punkt-Stopp-Zählung weit aus effektiver sind, als z. B. eine akustische Erfassung. Automatisierte Methoden sind eine wertvolle Ergänzung und sollten dort eingesetzt werden, wo herkömmliche Methoden sehr aufwändig oder gar unmöglich sind. Der Vorteil automatisierter Methoden besteht neben der Zeit- und Arbeitersparnis darin, dass die Erfassung vor Ort weitgehend störungsfrei erfolgt. Die Aufzeichnungstechnik kann zu einem Zeitpunkt aufgestellt werden, wo keine Störung vom Beobachter ausgeht. Der Einsatz von Technik ermöglicht auch eine kontinuierliche Langzeitüberwachung entweder durch ununterbrochene Aufzeichnung über längere Zeiträume, z. B. während einer kompletten Nacht, durch Erfassung nach einem Zeitraster oder durch Auslösen der Aufnahme, wenn bestimmte Rufe erkannt werden. Nicht zu vergessen ist, dass die Datenerfassung unabhängig von der Artenkenntnis des

Erfassers, seinen Sinnesleistungen und auch seiner Konzentrationsfähigkeit erfolgt. Im Folgenden sollen sinnvolle Einsatzszenarien für automatisierte Methoden exemplarisch umrissen werden:

- Erfassung des nächtlichen Vogelzuges. Dieses Ereignis kann vom Beobachter, abgesehen von der extrem eingeschränkten Möglichkeit der Beobachtung der Vögel vor der Mondscheibe, ohne technische Hilfe nur über die Lautäußerungen der ziehenden Vögel wahrgenommen werden, was allerdings sehr zeitaufwändig ist. Mit einer automatisierten Erfassung können jedoch vergleichsweise einfach wertvolle Informationen über das Zuggeschehen auch über längere Zeiträume gewonnen werden.
- Erfassung nachtaktiver Vogelarten (Eulen, Rallen). Das Monitoringprogramm für häufige Brutvogelarten erfasst durch die methodische Beschränkung auf die Morgenstunden diese Arten nicht. Für Eulen konnte gezeigt werden, dass der Erfassungsradius mittels automatisierter akustischer Methoden zumindest so groß ist wie der eines Erfassers vor Ort (Frommolt et al. 2008). Unter Einsatz mehrerer Aufzeichnungsgeräte kann sogar eine größere Fläche abgedeckt werden.
- Erfassungen in schwer zugänglichen Gebieten oder Kernzonen von Schutzgebieten. Die heutigen technischen Möglichkeiten erlauben es, über längere Zeiträume kontinuierlich aufzuzeichnen und damit auch eine Datenerfassung in Abwesenheit des Beobachters zu realisieren. Dadurch können Erfassungen in Kernzonen von Schutzgebieten auch ohne regelmäßige Begehungen durchgeführt werden.

Denkbar sind noch zahlreiche weitere Einsatzbereiche wie z. B. die Suche nach seltenen Vogelarten. Das von Hobson et al. (2002) vorgeschlagene Szenario der Erstellung von Tonaufzeichnung durch Hilfskräfte und Abhören durch Spezialisten erscheint uns zumindest für mitteleuropäische Verhältnisse mit einer hohen Beobachterdichte wenig geeignet. Die direkte Erfassung vor Ort kann hier durch geschulte Ornithologen abgesichert werden, wobei auch Sichtbeobachtungen berücksichtigt werden. Der breite Einsatz automatisierter Methoden erfordert, dass die Auswertung effektiver sein muss als herkömmliche „manuelle“ Methoden. Bisher liegen aber nur wenige exemplarische Lösungen für eine automatisierte Auswertung unter Nutzung von Algorithmen der akustischen Mustererkennung vor. Dabei sollte aber nicht außer Acht gelassen werden, dass mit den bereits vorhandenen Lösungen und Hilfsmitteln zahlreiche Aufgabenstellungen angegangen werden können. Eine weitere Voraussetzung sind preiswerte Aufzeichnungsgeräte mit empfindlichen Mikrofonen. Gerade in diesem Bereich zeichnet sich eine sehr dynamische Entwicklung ab. Es ist zu erwarten, dass in naher Zukunft auch technologische Lösungen, die auf Mobiltelefonen und mobilen Kleincomputern basieren, zum Einsatz kommen.

Zusammenfassung

Der gegenwärtige Kenntnisstand über automatisierte Methoden zur akustischen Erfassung von Rufen und Gesängen von Vögeln wird dargelegt. Die Grundlage für eine automatisierte Erfassung bilden Langzeitaufzeichnungen. Es wird der Frage nachgegangen, inwiefern Tonaufzeichnungen für eine qualitative und auch quantitative Analyse von Vogelbeständen geeignet sind. Spezielles Augenmerk wird autonomen Aufzeichnungsmethoden und der Auswertung von Langzeitaufzeichnungen unter Nutzung von Algorithmen der akustischen Mustererkennung gewidmet. Sinnvolle Einsatzszenarien für automatisierte Methoden im Rahmen avifaunistischer Feldforschung sind die Erfassung des nächtlichen Vogelzuges, die Erfassung nachtaktiver Brutvogelarten und die Datenerhebung in Kernzonen von Schutzgebieten.

Literatur

- Agrat ID 2007: Automatic detection of Cerulean Warblers using autonomous recording units and Song Scope bioacoustics software. *Wildlife Acoustics, Inc.*: 1-13. http://www.fs.fed.us/t-d/programs/im/acoustic_wildlife/Cerulean%20Warbler_%20Report_Final.pdf (letzter Zugriff 3.4.2012).
- Agrat ID 2009: Automatically identifying animal species from their vocalizations. *Wildlife Acoustics, Inc.*: 1-22. <http://www.wildlifeacoustics.com/wp-content/uploads/2011/08/Automatically-Identifying-Animal-Species-from-their-Vocalizations.pdf> (letzter Zugriff 3.4.2012).
- Avisoft Bioacoustics 2012: Avisoft-SASLab Pro version 5.2 Sound Analysis and Synthesis Laboratory for Microsoft Windows XP / Vista / 7 / 8. <http://www.avisoft.com/SASLab-Pro.pdf> (letzter Zugriff 3.4.2012).
- Bailey H, Clay G, Coates EA, Lusseau D, Senior B & Thompson PM 2010: Using T-PODS to assess variations in the occurrence of coastal Bottlenose Dolphins and Harbour Porpoises. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 20: 150-158.
- Bardeli R 2009: Similarity search in animal sound databases. *IEEE Transactions on Multimedia* 11(1): 68-76.
- Bardeli R, Wolff D, Kurth F, Koch M, Tauchert K-H & Frommolt K-H 2010: Detecting bird sounds in a complex acoustic environment and application to bioacoustic monitoring. *Pattern Recognition Letters* 31: 1524-1534.
- Blumstein DT, Mennill DJ, Clemins P, Girod L, Yao K, Patricelli G, Deppe JL, Krakauer AH, Clark CW, Cortopassi KA, Hanser SF, McCowan B, Ali AM & Kirschel ANG 2011: Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *J. Appl. Ecol.* 48: 758-767.
- Borucki H 1989: Einführung in die Akustik. BI Wissenschaftsverlag, Mannheim, Wien, Zürich.
- Brandes TS 2008: Feature vector selection and use with hidden Markov models to identify frequency-modulated bioacoustic signals amidst noise. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 16: 1173-1180.
- Buckland ST 2006: Point-transect surveys for songbirds: robust methodologies. *Auk* 123: 345-357.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 2007: Standard. Untersuchung der Auswirkung von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK 3). BSH-Nr. 7003. <http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Standard/7003.pdf> (letzter Zugriff 29.3.2012).
- Buxton RT & Jones IL 2012: Measuring nocturnal seabird activity and status using acoustic recording devices: application for island restoration. *J. Field Ornithol.* 83: 47-60.
- Celis-Murillo A, Deppe JL & Allen MF 2009: Using soundscape recordings to estimate bird species abundance, richness, and composition. *J. Field Ornithol.* 80: 64-78.
- Charif RA & Clark CW 2009: Acoustic monitoring of large whales in deep waters north and west of the British Isles: 1996-2005. Preliminary Report. Cornell Laboratory of Ornithology, Cornell University, Ithaca: 40. http://www.offshore-sea.org.uk/site/scripts/consultation_download_info.php?downloadID=237 (letzter Zugriff 3.4.2012).
- Collier TC, Kirschel ANG & Taylor CE 2010: Acoustic localization of Antbirds in a Mexican rainforest using a wireless sensor network. *J. Acoust. Soc. Am.* 128: 182-189.
- Depraetere M, Pavoine S, Jiguet F, Gasc A, Duval S & Sœur J 2012: Monitoring animal diversity using acoustic indices: implementation in a temperate woodland. *Ecological Indicators* 13: 46-54.
- Dierschke V 1989: Automatisch-akustische Erfassung des nächtlichen Vogelzuges bei Helgoland im Sommer 1987. *Vogelwarte* 35: 115-131.
- Dorcas ME, Price SJ, Walls SC & Barichivich WJ 2009: Auditory monitoring of anuran populations. In: Dodd CKJ (Hrsg): *Amphibian ecology and conservation. A handbook of techniques*: 281-298. Oxford University Press, Oxford.
- Evans WR 2005: Monitoring avian night flight calls - The new century ahead. *Passenger Pigeon* 67: 15-24.
- Evans WR & Mellinger DK 1999: Monitoring grassland birds in nocturnal migration. *Studies in Avian Biology* 19: 219-229.
- Farina A, Pieretti N & Piccioli L 2011: The soundscape methodology for long-term bird monitoring: a Mediterranean Europe case-study. *Ecological Informatics* 6: 354-363.
- Farnsworth A 2005: Flight calls and their value for future ornithological studies and conservation research. *Auk* 122: 733-746.
- Farnsworth A, Gauthreaux SA & van Blaricom D. 2004: A comparison of nocturnal call counts of migrating birds and reflectivity measurements on Doppler radar (WSR-88D). *J. Avian Biol.* 35: 365-369.
- Farnsworth A & Russel RW 2007: Monitoring flight calls of migrating birds from an oil platform in the northern Gulf of Mexico. *J. Field Ornithol.* 78: 279-289.
- Fitzsimmons LP, Foote JR, Ratcliffe LM & Mennill DJ 2008: Eavesdropping and communication networks revealed through playback and an acoustic location system. *Behav. Ecol.* 824-829.
- Flade M & Schwarz J 2004: Ergebnisse des DDA-Monitoringprogramms, Teil II: Bestandsentwicklung von Waldvögeln in Deutschland 1989-2003. *Vogelwelt* 125: 177-205.
- Frommolt K-H & Tauchert K-H 2008: Anwendungsszenarien eines auf bioakustischer Mustererkennung basierenden Monitorings. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 60: 153-158.
- Frommolt K-H, Tauchert K-H & Koch M 2008: Advantages and disadvantages of acoustic monitoring of birds – realistic scenarios for automated bioacoustic monitoring in a

- densely populated region. In: Frommolt K-H, Bardeli R & Clausen M (Hrsg): Computational bioacoustics for assessing biodiversity. Proceedings of the international expert meeting on IT-based detection of bioacoustical patterns, December 7th until December 10th, 2007 at the International Academy for Nature Conservation (INA), Isle of Vilm, Germany: 83-92. <http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript234.pdf> (letzter Zugriff 30.3.2012).
- Frommolt K-H & Tauchert K-H 2010a: Bioakustisches Monitoring von Brutvögeln. Fortschritte der Akustik - DAGA 2010: 493-494.
- Frommolt K-H & Tauchert K-H 2010b: Bioakustisches Monitoring von Rallen und Dommeln auf einer Renaturierungsfläche. Vogelwarte 48: 383-384.
- Gilbert G, Tyler GA & Smith KW 2002: Local annual survival of booming male Great Bittern *Botaurus stellaris* in Britain, in the period 1990-1999. Ibis 144: 51-61.
- Gilbert G, McGregor P & Tyler G 1994: Vocal individuality as a census tool: practical considerations illustrated by a study of two rare species. J. Field Ornithol. 65: 335-348.
- Graber RR & Cochran WW 1959: An audio technique for the study of nocturnal migration of birds. Wilson Bulletin 71: 220-236.
- Greenwood JJD, Baillie SR, Gregory RD, Peach WJ & Fuller RJ 1994: Some new approaches to conservation monitoring of British breeding birds. Ibis 137: S16-S28.
- Gunzburger MS 2007: Evaluation of seven aquatic sampling methods for amphibians and other aquatic fauna. Appl. Herpetol. 4: 47-63.
- Haselmayer J & Quinn JS 2000: A comparison of point counts and sound recording as bird survey methods in Amazonian southeast Peru. Condor 102: 887-893.
- Hill GE, Mennill DJ, Rolek BW, Hicks TL & Swiston KA 2006: Evidence suggesting that Ivory-billed Woodpeckers (*Campephilus principalis*) exist in Florida. Avian Conservation and Ecology 1. <http://www.ace-eco.org/vol1/iss3/art2/> (letzter Zugriff 29.3.2012).
- Hill R & Hüppop O 2008: Birds and bats: automatic recording of flight calls and their value for the study of migration. In: Frommolt K-H, Bardeli R and Clausen M (Hrsg): Computational bioacoustics for assessing biodiversity. Proceedings of the international expert meeting on IT-based detection of bioacoustical patterns, December 7th until December 10th, 2007 at the International Academy for Nature Conservation (INA), Isle of Vilm, Germany: 135-141. <http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript234.pdf> (letzter Zugriff 30.3.2012).
- Hobson KA, Rempel RS, Greenwood H, Turnbull B & Van Wilgenburg SL 2002: Acoustic surveys of birds using electronic recordings. new potential from an omnidirectional microphone system. Wildlife Society Bulletin 30: 709-720.
- Hüppop K, Dierschke J, Hill R & Hüppop O 2012: Jahres- und tageszeitliche Phänologie der Vogelrufaktivität über der Deutschen Bucht. Vogelwarte 50: 87-108.
- Hüppop O, Dierschke J, Exo K-M, Fredrich E & Hill R 2006: Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. Ibis 148: 90-109.
- Hüppop O, Exo K-M & Garthe S 2002: Empfehlungen für projektbezogene Untersuchungen möglicher bau- und betriebsbedingter Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf Vögel. Ber. Vogelschutz 39: 77-94.
- Hüppop O & Hilgerloh G 2012: Flight call rates of migrating thrushes: effects of wind conditions, humidity and time of day at an illuminated offshore platform. J. Avian Biol. 43: 85-90.
- Hutto RL & Stutzman RJ 2009: Humans versus autonomous recording units: a comparison of point-count results. J. Field Ornithol. 80: 387-398.
- Kirschel ANG, Cody ML, Harlow ZT, Promponas VJ, Vallejo EE & Taylor CE 2011: Territorial dynamics of Mexican Ant-Thrushes *Formicarius moniliger* revealed by individual recognition of their songs. Ibis 153: 255-268.
- Koch M, Frommolt K-H, Tauchert K-H, Bardeli R & Wolff D 2008: GPS-gestützte Linienkartierung des Rohrschwirls *Locustella luscinioides* in Kombination mit teilautomatisierter Mustererkennung. Vogelwarte 46: 353-354.
- Kogan JA & Margoliash D 1998: Automated recognition of bird song elements from continuous recordings using dynamic time warping and hidden Markov models: A comparative study. J. Acoust. Soc. Am. 103: 2185-2196.
- Kroodsma DE & E.H. Miller (Hrsg) 1996: Ecology and evolution of acoustic communication in birds. Cornell University Press, Ithaca & London.
- Larkin RP, Evans WR & Diehl RH 2002: Nocturnal flight calls of Dickcissels and Doppler radar echoes over South Texas in spring. J. Field Ornithol. 73: 2-8.
- Lengagne T 2001: Stability in the individual features in the calls of Eagle Owls (*Bubo bubo*). Behaviour 138: 1407-1419.
- Magyar I, Schleidt WM & Miller B 1978: Localization of sound producing animals using the arrival time differences of their signals at an array of microphones. Experientia 34: 676-677.
- McGregor PK, Dabelsteen T, Clark CW, Bower JL & Holland J 1997: Accuracy of a passive acoustic location system: empirical studies in terrestrial habitats. Ethol. Ecol. Evol. 9: 269-286.
- Mellinger DK & Clark CW 2000: Recognizing transient low-frequency whale sounds by spectrogram correlation. J. Acoust. Soc. Am. 107: 3518-3529.
- Mitschke A, Sudfeldt C, Heidrich-Riske H & Dröschmeister R 2005: Das neue Brutvogelmonitoring in der Normallandschaft Deutschlands – Untersuchungsgebiete, Erfassungsmethode und erste Ergebnisse. Vogelwelt 126: 127-140.
- Möhl B & Wahlberg M 2001: A large-aperture array of non-linked receivers for acoustic positioning of biological sound sources. J. Acoust. Soc. Am. 109: 434-437.
- Nemeth E. & Brumm H 2010: Birds and anthropogenic noise: are urban songs adaptive? American Naturalist 176: 465-475.
- Obrist MK, Boesch R & Flückiger PF 2004: Variability in echolocation call design of 26 Swiss bat species: consequences, limits and options for automated field identification with a synergetic pattern recognition approach. Mammalia 68: 307-322.
- Obrist MK, Boesch R & Flückiger P 2008: Probabilistic evaluation of synergetic ultrasound pattern recognition for large scale bat surveys. In: Frommolt K-H, Bardeli R and Clausen M (Hrsg): Computational bioacoustics for assessing biodiversity. Proceedings of the international expert meeting on IT-based detection of bioacoustical patterns, December 7th until December 10th, 2007 at the International Academy for Nature Conservation (INA), Isle of Vilm, Germany: 29-42. <http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript234.pdf> (letzter Zugriff 30.3.2012).

- Parker III TA 1991: On the use of tape recorders in avifaunal surveys. *Auk* 108: 443-444.
- Philpott E, Englund A, Ingram S & Rogan E 2007: Using T-PODs to investigate the echolocation of coastal Bottlenose Dolphins. *J. Mar. Biol. Ass. UK* 87: 11-17.
- Pieretti N, Farina A & Morri D 2011: A new methodology to infer the singing activity of an avian community: the Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators* 11: 868-873.
- Pröve E 1978: Quantitative Untersuchungen zu Wechselbeziehungen zwischen Balzaktivität und Testosterontitern bei männlichen Zebrafinken. *Z. Tierpsychol.* 48: 47-67.
- Rempel RS, Hobson KA, Holborn G, Van Wilgenburg SL & Elliott J 2005: Bioacoustic monitoring of forest songbirds: interpreter variability and effects of configuration and digital processing methods in the laboratory. *J. Field Ornithol.* 76: 1-11.
- Rohrbaugh RW, Rosenberg KV, Lammertink M, Swarthout E, Charif R, Barker S & Powers M 2006: Summary and conclusions of the 2005-06 Ivory-billed Woodpecker search in Arkansas. Ithaca, N.Y., Cornell Lab of Ornithology. <http://www.birds.cornell.edu/ivory/pastsearches/0607season/0607stories/finalreport06> (letzter Zugriff 3.4.2012).
- Runkel V 2008: Mikrohabitatnutzung syntoper Waldfledermäuse. Ein Vergleich der genutzten Strukturen in anthropogen geformten Waldbiotopen Mitteleuropas. Naturwissenschaftliche Fakultät. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Diss. Dr. rer. nat.: 164. <http://www.opus.ub.uni-erlangen.de/opus/volltexte/2008/971/pdf/VolkerRunkelDissertation.pdf> (letzter Zugriff 29.3.2012).
- Schwarz J & Flade M 2000: Ergebnisse des DDA-Monitoringprogramms. Teil 1: Bestandsänderungen von Vogelarten der Siedlungen seit 1989. *Vogelwelt* 121: 87-106.
- Simon M, Nuuttila H, Reyes-Zamundo MM, Ugarte F, Verfuß U & Evans PGH 2010: Passive acoustic monitoring of Bottlenose Dolphin and Harbour Porpoise, in Cardigan Bay, Wales, with implications for habitat use and partitioning. *J. Mar. Biol. Ass. UK* 90: 1539-1545.
- Spiesberger JL & Fristrup KM 1990: Passive localization of calling animals and sensing of their acoustic environment using acoustic tomography. *Amer. Natur.* 135: 107-153.
- Sueur J, Pavoine S, Hammerlynck O & Duvail S 2008: Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS ONE* 3: 1-9.
- Terry AMR, Peake TM & McGregor PK 2005: Census and monitoring based on individually identifiable vocalizations: the role of neural networks. *Frontiers in Zoology* 2: 10. doi:10.1186/1742-9994-2-10.
- Thompson ME, Schwager SJ & Payne KB 2009a: Heard but not see: an acoustic survey of the African Forest Elephant population at Kakum Conservation Area, Ghana. *Afr. J. Ecol.* 48: 224-231.
- Thompson ME, Schwager SJ, Payne KB & Turkalo AK 2009b: Acoustic estimation of wildlife abundance: methodology for vocal mammals in forest habitats. *Afr. J. Ecol.* 48: 654-661.
- Towsey M, Planitz B, Nantes A, Wimmer J & Roe P 2012: A toolbox for animal call recognition. *Bioacoustics* 12: 107-125.
- Verfuß UK, Honnef CG, Meding A, Dähne M, Mundry R & Benke H 2007: Geographical and seasonal variation of Harbour Porpoise (*Phocoena phocoena*) presence in the German Baltic Sea revealed by passive acoustic monitoring. *J. Mar. Biol. Ass. UK* 87: 165-176.
- Waddle JH, Thigpen TF & Glorioso BM 2009: Efficacy of automatic vocalization recognition software for anuran monitoring. *Herpetological Conservation and Biology* 4: 384-388.
- Wahlberg M, Tougaard J & Möhl B 2003: Localising Bitterns *Botaurus stellaris* with an array of non-linked microphones. *Bioacoustics* 13: 233-245.
- Walcott C, Mager JN & Piper W 2006: Changing territories, changing tunes: male Loons, *Gavia immer*, change vocalizations when they change territories. *Animal Behaviour* 71: 673-683.
- Weßling B 2000: Kranichgedanken. Margraf Verlag, Weikersheim.